

複数無線通信サービス環境におけるアプリケーション特性とネットワーク指標を考慮した基地局割り当て手法

2017年6月

亀田 栄一

目次

第1章	はじめに	1
第2章	割り当て問題を解く上での課題	3
2.1	ユーザ満足度の定量化	3
2.2	対象とする端末の地理的範囲	3
2.3	対象とする端末の時間的範囲	4
2.4	必要な情報のリアルタイムな把握	4
2.5	システム構成	4
2.6	行動予測機能の実装	4
第3章	本研究の位置づけ	5
3.1	関連研究における本研究の位置づけ	5
3.2	課題に対して本研究の位置づけ	6
3.2.1	ユーザ満足度の定量化	6
3.2.2	対象とする端末の地理的範囲	6
3.2.3	対象とする端末の時間的範囲	7
3.2.4	必要な情報のリアルタイムな把握	7
3.2.5	システム構成	7
3.2.6	行動予測機能の実装	7
第4章	割り当て問題への定式化	8
4.1	RTTギャップの定義	8
4.2	アプリケーションが必要とするRTT	8
4.2.1	通話アプリケーション	9
4.2.2	ブラウザ	9
4.2.3	各アプリケーションの必要RTT	10
4.3	接続時RTT	11
4.4	割り当て問題への定式化	11
第5章	提案システム	13
5.1	基地局情報取得部	13
5.2	接続先決定部	14
5.3	割り当て問題（ハンガリアン法）	16
5.4	端末制御部	16
5.5	システム要求事項	17

第 6 章	シミュレーション実験による評価	19
6.1	実験の概要	19
6.2	実験の評価	21
6.2.1	RTT ギャップ	21
6.2.2	基地局割り当てに要する処理時間	24
第 7 章	割り当て問題モデルの改善	25
7.1	端末満足度の定義	25
7.2	G_{TP} に属するアプリケーション	27
7.2.1	必要 TP	27
7.2.2	接続時 TP	27
7.3	G_{RTT} に属するアプリケーション	29
第 8 章	提案システムの改善	30
8.1	基地局情報取得部の改善	30
8.2	接続先決定部の改善	30
8.3	システム要求事項	32
第 9 章	シミュレーション再実験による評価	33
9.1	実験の概要	33
9.2	実験の評価	35
9.2.1	端末満足度	35
9.2.2	割り当て計算に要する処理時間	36
第 10 章	まとめと今後の課題	39

表 目 次

4.1	ポータルサイトにおけるトップページのデータ量	10
4.2	アプリケーションが必要とする RTT	10
6.1	実験 1(パターン 1) の概要	20
6.2	実験 1(パターン 2) の概要	21
6.3	実験 1(パターン 1) のシミュレーション結果	22
6.4	実験 1(パターン 2) のシミュレーション結果	22
7.1	各アプリケーション分類におけるネットワーク指標	26
7.2	動画ストリーミングサービスにおける通信条件	27
9.1	実験 2 における各基地局の TP 初期値・RTT 初期値	33
9.2	実験 2 における各アプリケーションの必要 TP・必要 RTT	34
9.3	実験 2 における端末数毎の処理時間	36
10.1	提案システムの課題対応状況	39

目 次

4.1	割り当て問題への定式化	12
5.1	ping を使用した基地局情報取得システム構成	14
5.2	接続先決定ロジックの流れ	15
5.3	ハンガリアン法の計算の流れ	17
5.4	端末制御のイメージ	18
6.1	実験 1(パターン 1) のシミュレーション結果 (グラフ)	23
7.1	PathQuick の仕組み	28
8.1	PathQuick, ping を使用した基地局情報取得システム構成	31
8.2	改善システムにおける接続先決定ロジックの流れ	32
9.1	実験 2 (ケース 1) のシミュレーション結果	37
9.2	実験 2 (ケース 2) のシミュレーション結果	37
9.3	実験 2 (ケース 3) のシミュレーション結果	38
9.4	実験 2 (ケース 4) のシミュレーション結果	38

第1章 はじめに

21 世紀に入り，いつでもどこでも快適なネットワーク環境に繋がる「ユビキタス社会」という理想に向け，ネットワークインフラは急速に発展してきた．

日本では 2008 年に iPhone が発売され，その後スマートフォンの普及が急激に進んだ．2010 年には 10%以下であったスマートフォンの世帯保留率は 2015 年には 70%を超えた [1]．これにより，どこでもネットワークに繋がるという状態が常識化した．また，これまで音声通話が中心だった携帯電話の利用から，ホームページ閲覧，音楽，動画，ゲームの利用など，データ通信量が急激に増加した．

これに対して日本では 2010 年に LTE のサービスが開始するなど，特にモバイル通信において，より快適なサービス品質をユーザに提供するために，電気通信事業者による膨大な設備投資と数多くの技術革新が行われ，通信速度の高速化と通信帯域の拡充が進んだ．また，モバイル通信トラフィックのオフロードを目的として，電気通信事業者の主導で無線 LAN の整備が進展しており，今後さらなる拡大が見込まれる [2]．文献 [3] では，2016 年にはモバイルデバイスからの全トラフィックのうち 60%が Wi-Fi デバイスなどにオフロードされたとし，2021 年には 63%がオフロードされると予測している．

しかし，駅などの人が集中する場所では，電気通信事業者の意図に反して，十分な通信速度が確保できないなどのサービス劣化が現在も散見されている．更に将来に目を向けると，今後も世界中でデータ通信量が増加していくと考えられる．文献 [3] によると，世界のモバイルデータトラフィックは，2016 年には 7.2EB/月であったが，2021 年には 49.0EB/月に増加すると予測しており，この期間中の CAGR(年平均成長率)は 47%であるとしている．特にスマートフォンの利用拡大が急激であり，モバイル通信ネットワークの帯域不足は未だ深刻な状態である．文献 [3] では，スマートフォン 1 台あたりのトラフィック量は，2016 年の平均 1.6GB /月から 2021 年には 6.8GB/月に増加すると予想している．

また，現在ネットワークに接続される主体の多くはスマートフォンであるが，今後 IoT(Internet of Things)の普及により，車，ウェアブル端末，電化製品，ドローンなどがネットワーク接続

の対象となり、日本では2020年には、IoTによる接続機器が500億台を超えることが予想されている[2]。通信速度、通信帯域のさらなる拡充も期待されるが、限られたネットワーク資源をさらに多くの機器で共有するしなければならない状況になる。

このように、通信技術の進展の歴史を展望すると、通信環境が整備されることに伴い、より高い品質のネットワーク環境を要求するアプリケーションが開発され、過剰供給と思われた通信速度や通信帯域が、アプリケーションの要求を満たせなくなるという状況がしばしば発生し、さらなる設備投資・技術革新が為される状況が繰り返してきた。これは、需要と供給の際限の無い競争であり、将来にわたっても技術革新によっては解決できない根源的な問題である。

この根源的な問題に対処するためには、設備投資や技術革新ではなく、限られたネットワーク資源を適切に配分するための割り当て問題を解くことがより重要となる。この問題は、ネットワーク上のステークホルダーが多様化する将来のIoT時代においてはさらに重要な課題となることが考えられ、割り当て問題を解くことは、その解決に寄与すると考えられる。

本論文では、対象をスマートフォンなどの携帯端末に絞って、大都市の駅などの人が集中する場所での割り当て問題を考える。我々は、求められるネットワーク環境の品質は、端末で使用しているアプリケーションの種類によって異なるという点に着目してサービス劣化の原因を考察し、「端末の基地局への割り当てにおけるミスマッチにより、サービス劣化が発生している」という仮説を立てた。このミスマッチは、端末の基地局の割り当てにおいて、端末で使用しているアプリケーションを考慮していないことに起因すると考えられる。この仮説が正しければ、ある端末で使用しているアプリケーションにとって適切な基地局に端末を割り当てることにより、限られたネットワーク資源の利用効率が向上し、ユーザの満足度が向上すると考えられる。

第2章 割り当て問題を解く上での課題

2.1 ユーザ満足度の定量化

ネットワークの通信性能に影響を与えうる適切な指標を用いて、ユーザ満足度を定量化することが必要となる。

ユーザ満足度を表す指標として、以下のような項目が挙げられる。

- ラウンドトリップタイム (Round-Trip Time, 通信相手に信号を発信してから応答が帰ってくるまでにかかる時間。以下, RTT)
- スループット (Throughput, 単位時間あたりのデータ転送量。以下, TP)
- 通信の暗号化方式, 認証方式
- 料金体系

ユーザの体感に直接影響を与えるネットワーク指標としては, RTT, TP がある。

セキュリティの観点からユーザ満足度に影響を与えるものとしては, 通信の暗号化方式, 認証方式がある。通信の暗号化方式としては, WEP(Wired Equivalent Privacy), TKIP(Temporal Key Integrity Protocol), AES(Advanced Encryption Standard) など, 認証方式としては, WPA(Wi-Fi Protected Access), WPA2, RADIUS(Remote Authentication Dial In User Service) 認証などの技術がある。これらの方式の違いにより, 通信内容の漏洩に対する堅牢さなどが異なり, ユーザ満足度に影響を与える。

また, 定額の通信費用や通信量の上限值などの料金体系も, ユーザ満足度に影響を与える。

2.2 対象とする端末の地理的範囲

地理的範囲の広さによって考慮すべき基地局の種類と数が異なり, ユーザ満足度が変わる可能性がある。基地局の種類としては, LTE と WiFi が考えられる。LTE と WiFi では, 接続端末数に

よるユーザ満足度の変化は異なる．例えば，WiFiは通信プロトコルとしてCSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance)を採用しているので，端末数の増加に対するパフォーマンスの減少が，LTEと比べて激しいと考えられる．これらのことから，対象とするべき地理的範囲の広さを確定させることが必要になる．

2.3 対象とする端末の時間的範囲

基地局に接続されている端末が変化すると、基地局のRTTやTPは動的に変化する．また，モバイル端末を対象とした場合，現実の世界では，あるエリアにおける端末の参入と離脱は継続的に発生しており，他の端末の行動が別の端末の満足度に影響を与えていると考えられる．そのため，端末の参入と離脱が継続的に発生する現実的な環境に対応することが必要になる．

2.4 必要な情報のリアルタイムな把握

割り当て問題を解くためには，各基地局と各端末の正確な情報をリアルタイムに把握する必要がある．基地局の情報としては，RTTとTPのリアルタイムな値，LTEやWiFiなどの技術的特性や地理的環境に基づくRTTおよびTPの変化の傾向などが考えられる．端末の情報としては，使用しているアプリケーションがある．

2.5 システム構成

上記の課題を考慮したうえで，どのようなシステム構成で実装するかということも，大きな課題である．現実システムを稼働させるためには，できるだけシンプルなシステム構成が求められる．

2.6 行動予測機能の実装

短時間で多くのユーザが移動を繰り返す環境では，現時点で最適な割り当てを行っても，次の瞬間には最適ではなくなっている可能性がある．これに対応するためには，各ユーザがどのような行動をとるかを予測し，システムで考慮する必要がある．

第3章 本研究の位置づけ

3.1 関連研究における本研究の位置づけ

本章では、関連研究における本研究の位置づけを述べる。

WiFi 基地局の選択に関する研究として、文献 [4][5][6][7] がある。文献 [4] では、ネットワークトラフィック負荷の分散のために、チャネル利用率の高い WiFi 基地局からチャネル利用率の低い WiFi 基地局へ端末を移動させることを検討している。文献 [5] では、各 WiFi 基地局に接続した場合のスループット、他の端末の通信状況を考慮して、接続する WiFi 基地局を選択することを検討している。文献 [6] では、各 WiFi 基地局の遅延、スループットなどの状態から、端末が接続されるべき WiFi 基地局を、ヒューリスティックなロジックにより決定する提案を行っている。文献 [7] では、端末と WiFi 基地局間のビーコン情報に、WiFi 基地局の負荷に関するフィールドを追加し、端末が WiFi 基地局に接続した場合の負荷状況を考慮して、接続する WiFi 基地局を選択するシステムを提案している。しかし、文献 [4][5][6][7] は共に、ユーザが使用しているアプリケーションにより、必要な環境が異なることは考慮されていない。

使用しているアプリケーションを考慮した WiFi 基地局選択の研究としては、文献 [8][9][10] がある。文献 [8] においては、特定のアプリケーションを使用している通信について、伝送レートを元に WiFi 基地局を切り替えることにより、QoS(Quality of Service) を確保することが提案されている。また、文献 [9] においては、端末で使用されているアプリケーションの種類に応じて、電波強度、利用可能帯域、遅延などを元に、適切な経路を選択する方式が提案されている。文献 [10] においては、FTP(File Transfer Protocol) に代表される TCP(Transmission Control Protocol) トラヒックと、VoIP(Voice over Internet Protocol) に代表される UDP(User Datagram Protocol) トラヒックの違いを考慮した、WiFi 基地局の選択アルゴリズムを提案している。しかし、これらの提案においては、同時に複数の端末を接続させる場合の対応については、検討されていない。

本研究では、同時に複数の端末が基地局に接続する場合の組み合わせを割り当て問題として

捉え、ハンガリアン法を活用することにより、基地局を適切に端末に割り当てる方式について提案している。

3.2 課題に対して本研究の位置づけ

3.2.1 ユーザ満足度の定量化

ユーザ満足度の定量化については、本研究では、ユーザの体感に影響を与えるものとして、RTT と TP のみを対象とする。すべてのアプリケーションにおいて、RTT と TP の両方がユーザ満足度に影響を与える可能性がある。さらに、RTT が悪化すると TP も悪化するなど、RTT と TP の間でも相関がある。これらを踏まえた上で、次章以降で、RTT と TP を考慮したユーザ満足度の定式化を試みる。

なお、RTT と TP によるユーザ満足度への影響は、個々のアプリケーション毎に異なる可能性がある。しかし、アプリケーションの数は無限にあり、個々のアプリケーション毎に影響を把握することは現実的では無い。一方、RTT と TP のユーザ満足度への影響は、通話アプリケーションやブラウザなどのアプリケーション種類により異なると考えられる。よって、本研究では、ユーザ満足度への影響をアプリケーション種類毎に捉えることとする。

また、トランスポート層のプロトコルとして UDP を使用したアプリケーションの場合と、TCP を使用したアプリケーションの場合とでは、RTT や TP のユーザ満足度への影響は異なる。しかし、動画ストリーミングサービスではブレイクダウンロードが使用されるなど、現在一般的なサービスの多くで TCP が使用されているため、本研究においても TCP を前提としている。

3.2.2 対象とする端末の地理的範囲

本研究では、大都市の駅を想定しており、LTE 基地局 1 台、WiFi 基地局 2 台程度、合計 3 台程度が、1 端末が実際的に選択可能な基地局の数であると考えられる。よって、対象とする端末の地理的範囲は、LTE 基地局 1 台、公衆 WiFi 基地局 2 台が選択可能な範囲にいる端末とする。なお、周波数チャンネルが重なるような隣接する公衆 WiFi 基地局間では、一方の公衆 WiFi 基地局に接続された端末が、他方の公衆 WiFi 基地局の RTT や TP にも影響を与えることが想

定される。しかし周波数チャネルの重なりは最小限に抑えるよう、ある程度計画的に配置されているものとし、前述のような影響は限定的であると考え、ここでは無視して考えている。

3.2.3 対象とする端末の時間的範囲

時間的範囲については、7章以降で、端末の参入と離脱が継続的に発生する現実的な環境に対応することを検討する。

3.2.4 必要な情報のリアルタイムな把握

必要な情報のリアルタイムな把握については、本研究では、基地局情報としては、4.3節および7.2.2項で示す通り、一定間隔で正確な情報を取得し、その後の接続端末数の増減から想定値を計算して使用する。なお、各端末が使用しているアプリケーションとしては、フォアグラウンドで使用している1つのアプリケーションに限定し、基地局に接続を試みるときに端末から情報が発信されることとしている。

3.2.5 システム構成

システム構成は、各端末が協調的に動作する分散型システムがよりシンプルであり、理想であるが、本研究ではリアルタイムな情報収集の仕組みなどを鑑み、集中制御型を採用する。

3.2.6 行動予測機能の実装

行動予測機能の実装は、本研究では対象外とし、まずはユーザの移動が限定的である環境を想定して、現時点の情報での最適な割り当てを行うこととする。

第4章 割り当て問題への定式化

4.1 RTT ギャップの定義

3.2.1 項で述べた通り，ユーザ満足度には，RTT と TP の両方が影響している可能性があるが，ここではまず問題の単純化のため，RTT のみがユーザ満足度に影響を与えるものとして考える．

モバイル端末を使用しているユーザが体感するレスポンスタイムは，モバイル端末がある基地局に接続した場合に得られる RTT が，端末上で使用されているアプリケーションが必要とする RTT より長くなった場合に悪化すると仮定する．

使用しているアプリケーションが必要とする RTT（必要 RTT）と，端末がある基地局に接続した場合に得られる RTT（接続時 RTT）との差を，RTT ギャップと定義し，対象エリア内の端末全体の RTT ギャップを低減させることを検討する．本章では，RTT ギャップを最小化することにより，ユーザ満足度を最大化することができるとする．RTT ギャップ (G_{RTT}) は，必要 RTT (RTT_{need}) および接続時 RTT (RTT_{link}) より，式 4.1 で表される．

$$G_{RTT} = RTT_{link} - RTT_{need} \quad (4.1)$$

4.2 アプリケーションが必要とする RTT

アプリケーションが必要とする RTT は，アプリケーションの種類によって異なる．ただし，異なるアプリケーションであっても，たとえば同じ「通話を目的としたアプリケーション」であれば，同様の RTT が必要と考えられる．そこで，ここではアプリケーションを以下の 3 種類に分類し，それぞれの必要 RTT を算出する

- 通話アプリケーション
- ブラウザ

- その他（リアルタイム性を必要としないアプリケーション）

なお，現実的には一つの端末上で複数のアプリケーションが同時に通信を行っている．理想的には，複数のアプリケーションの通信を考慮した必要 RTT、必要 TP の算出に対応すべきであるが，本研究では，問題を単純化するため，各端末が使用しているアプリケーションとしては，フォアグラウンドで使用している 1 つのアプリケーションに限定して考える．

4.2.1 通話アプリケーション

通話アプリケーションについては，総務省が「050 I P 電話」の遅延の基準を「400ms 未満」と定めている [11]．この値は，対象端末から相手端末までの到達時間の基準である．よって，対象端末からアクセスネットワークまでの間で必要な RTT は，400ms の半分の 200ms 程度と考えることができる．なお，ここでは音声のみの通話を対象としており，必要なスループットは十分に小さいと考えられるため，必要 RTT は回線のスループットに影響されることはないとは仮定している．

4.2.2 ブラウザ

主なポータルサイトのトップページのデータ量を表 4.1 に示す．多くのサイトのトップページが 1,500kB 以下であるため，ここでは 1,500kB のサイトに接続した場合について考える．また，Forrester Consulting の報告によると，約半数のユーザが 2 秒以下のレスポンスタイムを期待している [12]． $x[B]$ のデータを $y[s]$ で表示させるために必要なスループット $T[bps]$ は，式 4.2 で表せることから，1,500kB のサイトを 2,000ms で表示させるために必要なスループットは，6Mbps である．

$$T = 8x/y \quad (4.2)$$

さらに，TCP におけるウィンドウサイズが 64kB の場合， $T[bps]$ のスループットを実現するために必要は RTT $R[s]$ は，式 4.3 で表せることから，6Mbps を実現するために必要な RTT は，85ms となる．

表 4.1: ポータルサイトにおけるトップページのデータ量

サイト名	URL	データ量 (kB)
Yahoo!	m.yahoo.co.jp	467
goo	www.goo.ne.jp	730
MSN	jp.msn.com	580
Infoseek	www.infoseek.co.jp	1,390
Excite	a.excite.co.jp	1,463
はてな	www.hatena.ne.jp	1,480
ライブドア	www.livedoor.com/lite	573
価格 com	s.kakaku.com	817
amazon	www.amazon.co.jp	608
朝日新聞	www.asahi.com	1,073
読売新聞	www.yomiuri.co.jp	1,004
日経新聞	www.nikkei.com	1,147
毎日新聞	sp.mainichi.jp	3,337
産経新聞	sankei.jp.msn.com/smp	656

$$R = 64/8T \quad (4.3)$$

なお、今回は1ページ当たりのデータ量として、暫定として主なポータルサイトのトップページの値を元にしたが、実運用においては、この値を精査していくことになる。

4.2.3 各アプリケーションの必要 RTT

以上のことから、各アプリケーションにおいて必要な RTT を表 4.2 のように定義する。

表 4.2: アプリケーションが必要とする RTT

アプリケーションの種類	必要 RTT
通話アプリケーション	200ms
ブラウザ	85ms
その他	制限なし

4.3 接続時 RTT

バックボーンネットワークからアクセスネットワークを経由した各基地局までの RTT を, ping を使用して定期的に把握しておく. ここでバックボーンネットワークとは, 大規模な通信ネットワークにおいて拠点間や事業者間を結ぶ大容量の通信回線網を指し, アクセスネットワークとは, 端末からバックボーンネットワークまでに至るネットワークを指す.

また, 頻繁に正確な RTT を取得することは難しいため, ping による RTT 取得後の RTT の変化は, 接続端末数から計算することとする. 今, ping によって得られた, ある基地局の RTT の値を RTT_{ping} とし, その後にその基地局に接続された端末数を x とする. また, 当該基地局に接続される端末数による当該基地局の RTT の変化を表す RTT 関数を $f_{rtt}(x)$ とする. $f_{rtt}(x)$ は, x についての単調増加関数である. この時, 当該基地局の接続時 RTT(RTT_{link}) は, 式 4.4 で表すことができる.

$$RTT_{link} = RTT_{ping} + f_{rtt}(x) \quad (4.4)$$

4.4 割り当て問題への定式化

基地局 b_i の端末収容可能数を x_i とした場合, 基地局 b_i には x_i の「基地局リソース」が存在すると定義する. 基地局 b_i の j 番目の基地局リソースを a_j^i , 基地局数を P とすると, $a_1^1, a_2^1, \dots, a_{x_1}^1, a_1^2, a_2^2, \dots, a_{x_2}^2, \dots, a_1^P, a_2^P, \dots, a_{x_P}^P$ の基地局リソースが存在すると捉えることができる. 全体収容数 M は, 以下の式 4.5 で求められる.

$$M = \sum_{i=1}^P x_i \quad (4.5)$$

今, 同じエリア内に端末 t_1, t_2, \dots, t_n が存在しているとする. 本研究で考える接続先決定ロジックは, M 個から n 個だけ抽出した基地局リソースと, n 個の端末における, RTT ギャップの総和が最小となる割り当て問題と捉えることができる. 割り当て問題とは, 2 部グラフの重みを最小 (もしくは最大) にする完全マッチングを解く問題であり, これはグラフ理論の手法の 1 つである. M 個から n 個の基地局リソースを抽出するすべての組み合わせに対して, 割り当て問題を解くことにより, システム全体の RTT ギャップを最小化する, 基地局と端末の組み合わせを導出することができる. この時, 収容数制限を考慮しない場合に取り得る組み合わせ

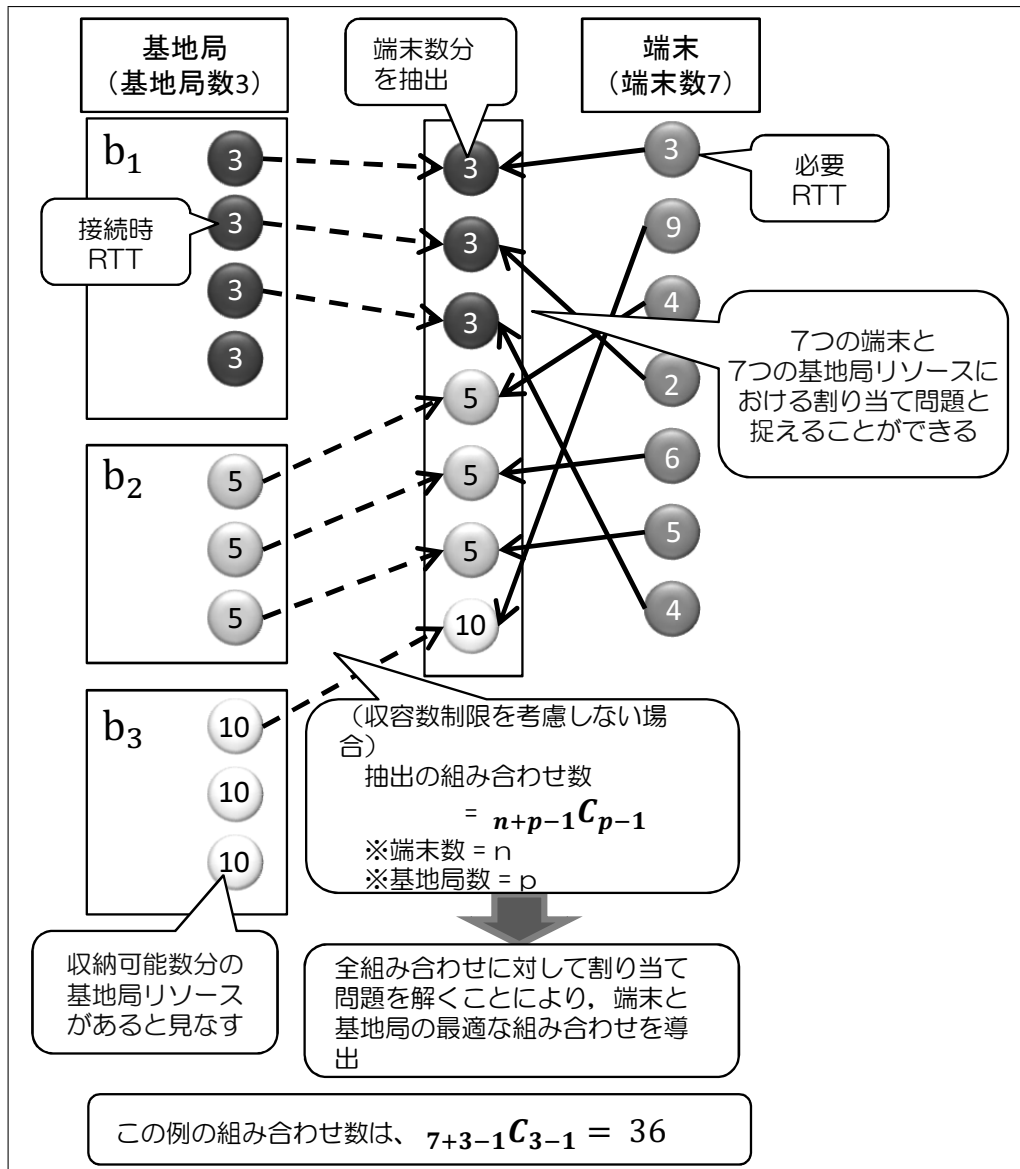


図 4.1: 割り当て問題への定式化

数は、端末数 n を基地局リソース数 P に分類する組み合わせ数と等しく、式 4.6 で表すことができる。

$${}_{(n+P-1)}C_{(P-1)} \quad (4.6)$$

各基地局の収容可能数に上限があるため、実際の組み合わせ数は式 4.6 の値よりも少なくなる。この組み合わせ数が割り当て問題を計算する回数となる。割り当て問題への定式化の概要を、図 4.1 に示す。

第5章 提案システム

提案システムは，基地局情報取得部，接続先決定部，端末制御部の3つの部分により構成される．本章では，各構成部について説明する．

なお，コントロールサーバによる情報収集，および決定結果の配信に時間を要することになる．しかし，ユーザがある一定時間以上，同じアプリケーションを使用し続ける状況においては，ある程度の時間ロスは許容できると考えられる．

また，本研究では，LTE や WiFi などの基地局自体には変更を加えず，接続先コントロールサーバと端末のやりとりによって，最適な基地局への割り当てを実現する．

5.1 基地局情報取得部

本研究では，各端末が各基地局に接続した場合の接続時 RTT を定期的に把握するために，ping を使用する．

ping を使用した接続時 RTT 取得のシステム構成を図 5.1 に示す．各基地局に情報取得用端末を常時接続させておく．また，アクセスネットワーク側には，接続先コントロールサーバを設置する．各基地局に接続した情報取得用端末から接続先コントロールサーバまでの RTT を，ping を使用して定期的に取得する．

このとき，接続先コントロールサーバを設置する場所は，各基地局が含まれるアクセスネットワークとは別のアクセスネットワークとし，接続先コントロールサーバから各基地局へは，バックボーンネットワークを経由して通信が行われるものとする．ここで，実際に端末からあるアプリケーションを使用したときに通信が行われるサーバが，接続した基地局が含まれるアクセスネットワーク自体に接続されていた場合には，接続先コントロールサーバで取得した接続時 RTT よりも実際の値がよくなる可能性があるが，ここでは，実際の通信先へも必ずバックボーンネットワーク経由で通信が行われるものとする．

また．接続先コントロールサーバの周辺のネットワーク環境により，ping の結果が変わり，

接続時 RTT の計算結果に影響を与える可能性があるが、ここでは周辺のネットワーク環境による影響は無いものとする。

基地局	LTE	WiFi1	WiFi2
RTT	51.2ms	17.0ms	34.1ms

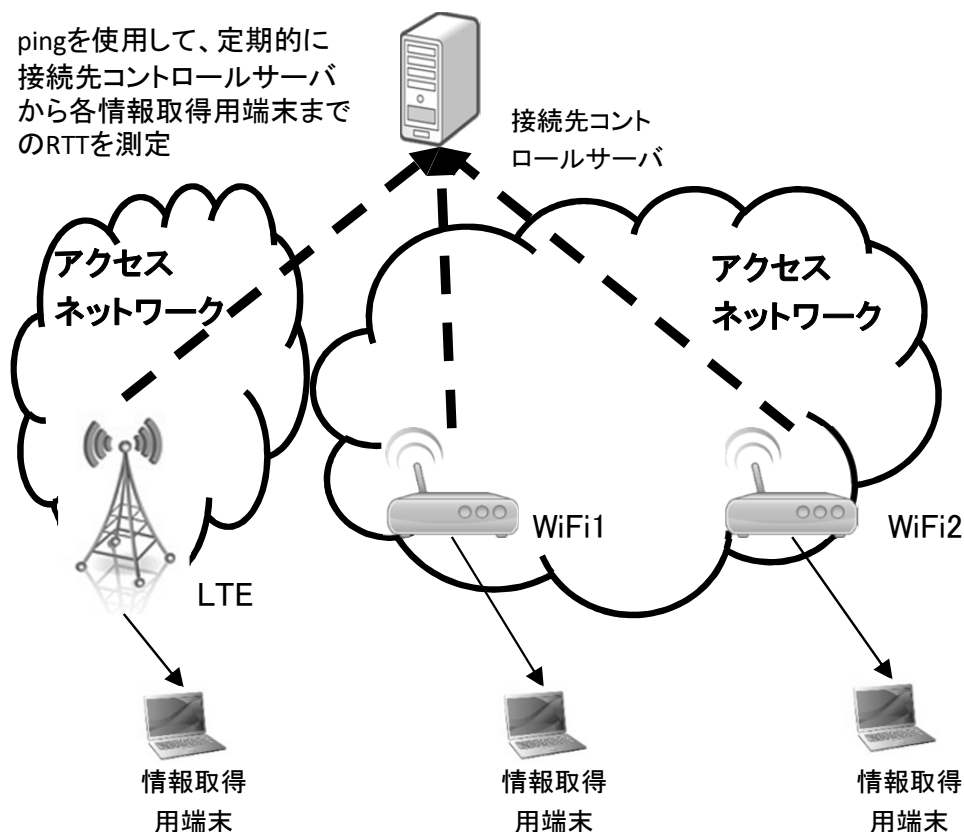


図 5.1: ping を使用した基地局情報取得システム構成

5.2 接続先決定部

4.4 節で示した通り、全体収容数 M から端末数 n 個だけ抽出した基地局リソースと、 n 個の端末において、各基地局に対する各端末の RTT ギャップを元に、最適な基地局と端末の組み合わせを算出する。

この時、各端末における必要 RTT は、各端末で使用されているアプリケーションを元に表 4.2 から算出する。また、RTT ギャップの計算に使用される接続時 RTT は、基地局情報取得部によって定期的に取得された RTT、およびその後に対象基地局に接続された端末数を元に、式 4.4 に従って算出される。これらの接続時 RTT および必要 RTT を元に、RTT ギャップを算出

する．なお，ここでRTTギャップがマイナスの時は，必要RTTよりも接続時RTTの方が小さい値になり，ユーザが体感するレスポンスタイムは自身が望むものよりも短くなるため，実質的にRTTギャップが0の場合と同等として考えることができる．すなわち，RTTギャップのマイナスの値が大きくなることは，システム全体の利用効率には寄与しないため，ここではマイナスの値をすべて0に置き換える．また，アプリケーションの種類が「その他」の場合，表4.2により必要RTTは「制限なし」となるが，これは接続時RTTの値に寄らず，必ず必要RTTが満たされることを意味するため，RTTギャップは0とする．

全体収容数 M から，端末数 n を抽出するすべての組み合わせについて，同様の計算を行う．すべての組み合わせで算出された解のうち，RTTギャップの総和が最小となるものを，全体の最適解として選択する．ここで，複数の最適解が得られた場合は，標準偏差が一番小さい解を選択する．接続先決定ロジックの流れを図5.2に示す．なお本研究では，上記の最適解の算出において，割り当て問題の手法の一つであるハンガリアン法を使用する．

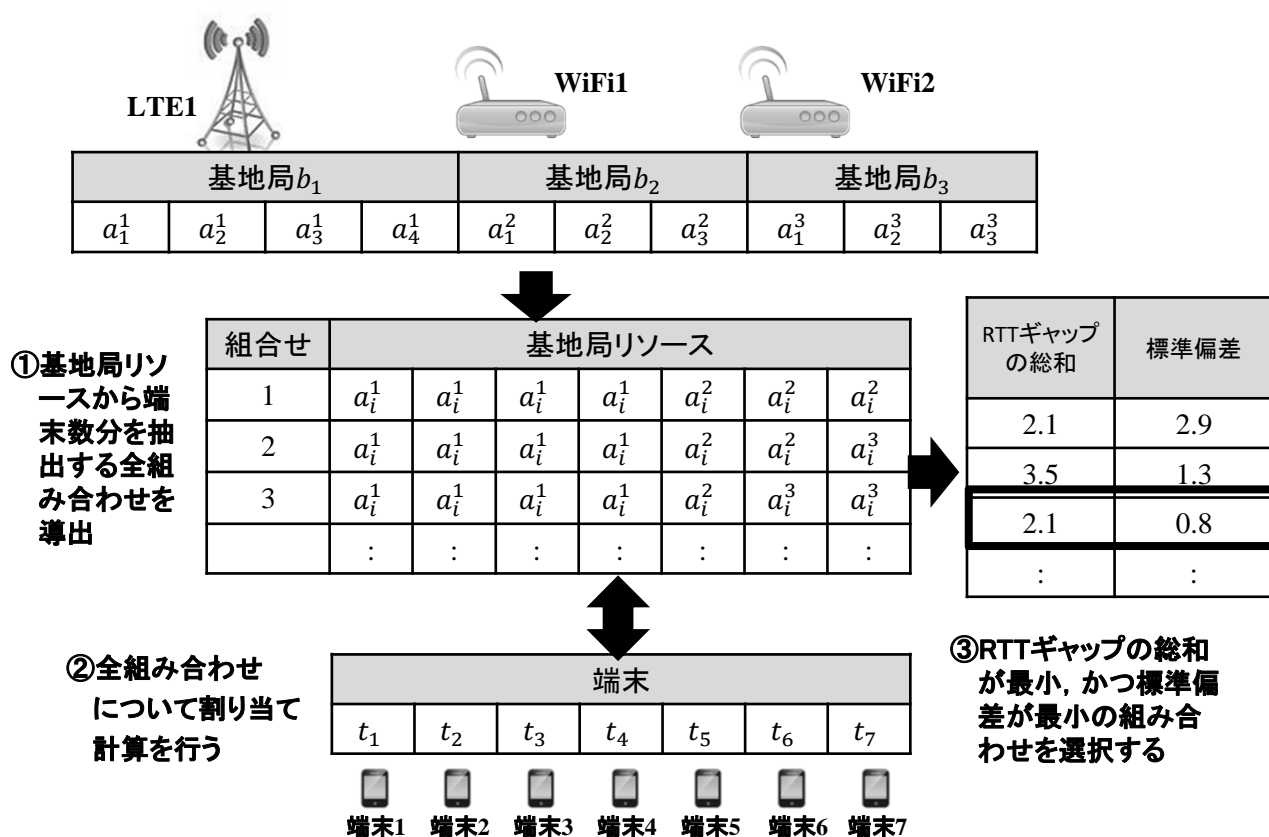


図 5.2: 接続先決定ロジックの流れ

5.3 割り当て問題（ハンガリアン法）

本節では、本研究で使用するハンガリアン法について解説する。

5.2 節で述べた、 n 個だけ抽出した基地局リソースと、 n 個の端末の、それぞれの組み合わせにおける RTT ギャップを、サイズ $n \times n$ の行列で表すことができる。これを割り当て問題におけるコスト行列と見なす。ここでコスト行列の各行は各基地局リソースを表し、各列は各端末を表している。本研究で使用するハンガリアン法は、与えられたコスト行列に対して以下の手順を施すことによって、割り当て問題を解く手法である。

1. 与えられた行列（図 5.3①）に対して、各行の各要素からその行の最小値を引き（図 5.3②），さらに各列の各要素からその列の最小値を引く（図 5.3③）
2. すべての 0 をできるだけ少ない数の縦または横の線で覆う（図 5.3④，ここでは、3 本の線ですべての 0 を覆うことができる）。この時引いた線の本数が、行列の大きさ（図 5.3 の場合は 4）と同じか、それよりも大きい場合は、各行各列から 0 を 1 つずつ選ぶことができるため、処理を終了する。
3. （2）で引いた線の本数が、行列の大きさよりも小さい場合、線が引かれていない要素から、線が引かれていない要素の最小値を引く。また、線が重なっている要素に、線が引かれていない要素の最小値を足す。（図 5.3⑤）

以後、終了するまで（2）（3）を繰り返す。以上の操作により、重みを最小化とする組み合わせを導出することができる。

本研究では、各端末の各基地局リソースに対する RTT ギャップをコスト行列とし、RTT ギャップを最小化する組み合わせを、ハンガリアン法を用いて導出する。

5.4 端末制御部

5.2 節にて算出された組み合わせを元に、接続先コントロールサーバから各端末へ制御情報を送信する。各端末は、受信した制御情報に従って、接続先の基地局を切り替える。端末制御のイメージを、図 5.4 に示す。

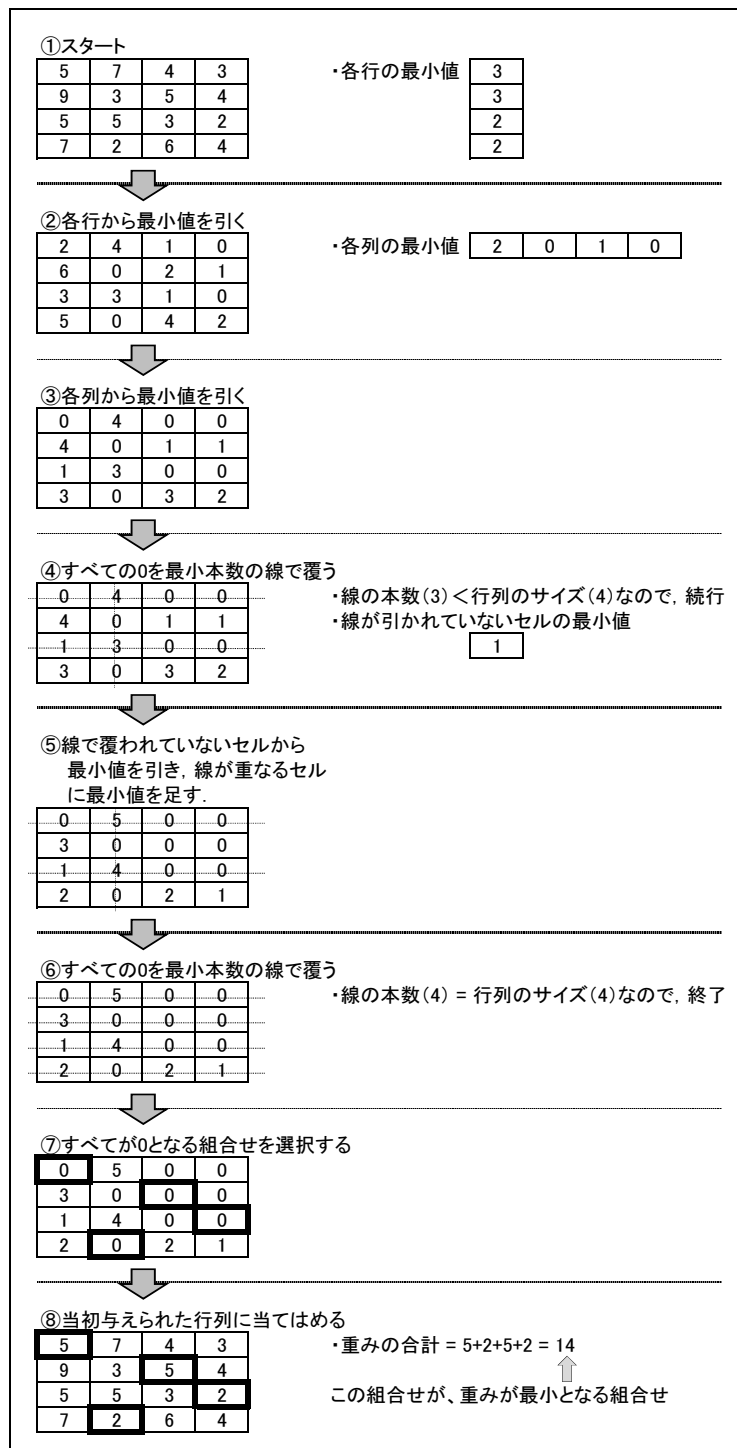


図 5.3: ハンガリアン法の計算の流れ

5.5 システム要求事項

提案システムに求められる条件は以下の2つになる。

RTT ギャップの最小化

提案システムには、ユーザ満足度の指標として定量化した RTT ギャップを最小化するこ

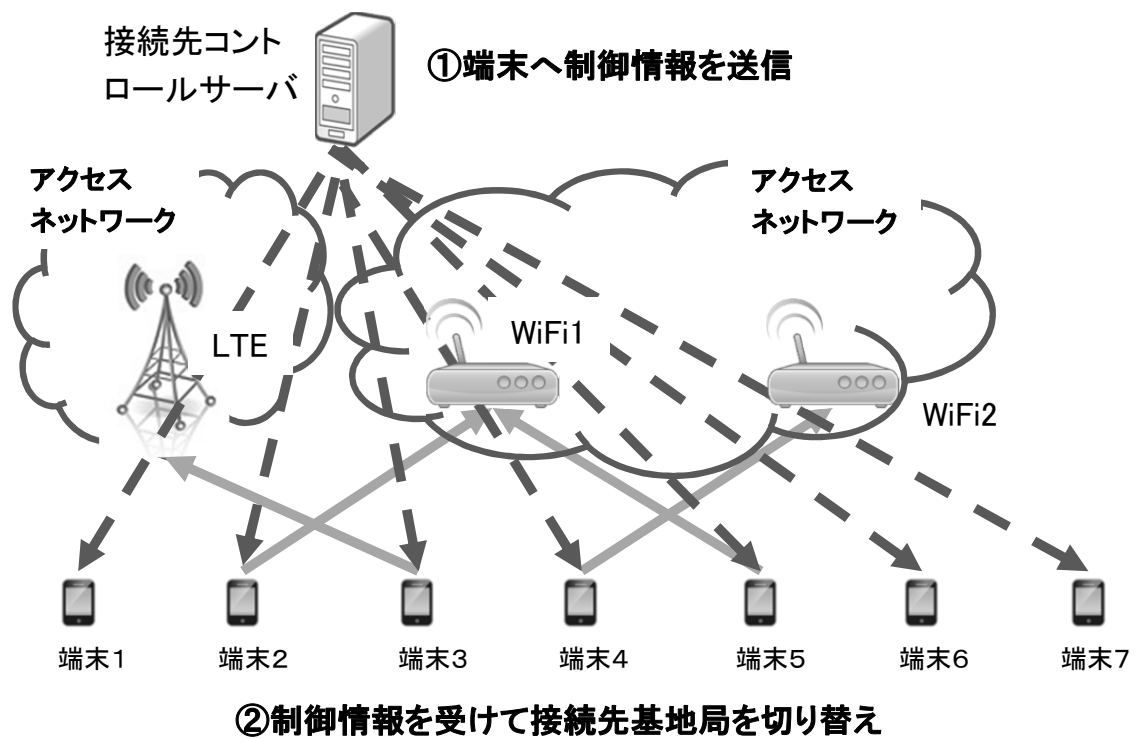


図 5.4: 端末制御のイメージ

とが求められる。

一定時間内での基地局割り当て処理

ここでは、ユーザが1つのアプリケーションを30秒程度使い続けることを想定する。この場合、提案システムにおける基地局割り当て処理は、数秒オーダーで終了することが求められる。

第6章 シミュレーション実験による評価

6.1 実験の概要

5章で述べた提案システム全体のうち、接続先決定部についてシミュレーションプログラムを作成し、大都市の駅内における1エリアを想定して実験を行った（実験1）。

今回の実験においては、新たに接続される端末数が100台の場合（パターン1）と10台の場合（パターン2）のそれぞれで、接続時RTTの初期値、RTT増分、および1基地局あたりの収容可能残数の組み合わせにより実験を行った。ここで「収容可能残数」は、1基地局あたり残り何台の端末を収容可能かを示す値である。1基地局あたりの収容可能残数が端末数よりも大きい値の場合は、すべての端末を1つの基地局に収容することが可能であり、実質的に収容可能数による制限がない状態と言える。1基地局あたりの収容可能残数が小さくなるに従い、本来接続したい基地局に接続できない端末が増えることになる。ただし、どの基地局にも接続できない端末が発生しないように、今回の実験においては、全ての基地局の収容可能残数の総和は、端末数よりも大きい値を取るようにした。

実験を行った各ケースの概要を表6.1および6.2に示す。いずれも、割り当て先となる基地局数は3つとした。

なお、接続時RTTの初期値 RTT_{init} は、pingによって直近に取得されたRTTの当該基地局の値 RTT_{ping} 、当該基地局のRTT関数 $f(x)$ 、およびping取得時からの接続端末数の増減 $term_{diff}$ により、式6.1で示される。

$$RTT_{init} = RTT_{ping} + f(term_{diff}) \quad (6.1)$$

ここでは便宜上、各基地局のRTT関数 $f(x)$ を1次関数と見なしシミュレーションを行った。表6.1および6.2のRTT増分は、 $f(x)$ の傾きに相当する。

表 6.1: 実験 1(パターン 1) の概要

ケース名	RTT 初期値 (ms)			RTT 増分 (ms)	1 基地局あたりの 収容可能残数 (台)
	基地局 1	基地局 2	基地局 3		
case1-1-1	20	40	60	1	40
case1-1-2	20	40	60	1	70
case1-1-3	20	40	60	1	100
case1-2-1	40	60	80	1	40
case1-2-2	40	60	80	1	70
case1-2-3	40	60	80	1	100
case1-3-1	60	80	100	1	40
case1-3-2	60	80	100	1	70
case1-3-3	60	80	100	1	100
case1-4-1	80	100	120	1	40
case1-4-2	80	100	120	1	70
case1-4-3	80	100	120	1	100
case2-1-1	20	40	60	2	40
case2-1-2	20	40	60	2	70
case2-1-3	20	40	60	2	100
case2-2-1	40	60	80	2	40
case2-2-2	40	60	80	2	70
case2-2-3	40	60	80	2	100
case2-3-1	60	80	100	2	40
case2-3-2	60	80	100	2	70
case2-3-3	60	80	100	2	100
case2-4-1	80	100	120	2	40
case2-4-2	80	100	120	2	70
case2-4-3	80	100	120	2	100

各端末で使用しているアプリケーションとしては、「通話アプリケーション」「ブラウザ」「その他」のうちのいずれかをランダムに割り当てた。また、各アプリケーションにおける必要 RTT は、表 4.2 の値を使用した。

シミュレーションプログラムでは、式 4.6 で求められる各基地局の収容数全体から端末数分を抽出しうるすべての組み合わせ数に対して、ハンガリアン法による計算を行い、全組み合わせの中で RTT ギャップの合計が最小になるものの中で、標準偏差が最小になるものを出力している。

また本実験では、提案システムでの計算（解法 1）以外に、以下の 2 つのロジックについても、各ケースにおける計算を行った。

表 6.2: 実験 1(パターン 2) の概要

ケース名	RTT 初期値 (ms)			RTT 増分 (ms)	1 基地局あたりの 収容可能残数 (台)
	基地局 1	基地局 2	基地局 3		
case3-1-1	100	120	140	1	4
case3-1-2	100	120	140	1	7
case3-1-3	100	120	140	1	10
case3-2-1	120	140	160	1	4
case3-2-2	120	140	160	1	7
case3-2-3	120	140	160	1	10
case3-3-1	140	160	180	1	4
case3-3-2	140	160	180	1	7
case3-3-3	140	160	180	1	10
case3-4-1	160	180	200	1	4
case3-4-2	160	180	200	1	7
case3-4-3	160	180	200	1	10
case4-1-1	100	120	140	2	4
case4-1-2	100	120	140	2	7
case4-1-3	100	120	140	2	10
case4-2-1	120	140	160	2	4
case4-2-2	120	140	160	2	7
case4-2-3	120	140	160	2	10
case4-3-1	140	160	180	2	4
case4-3-2	140	160	180	2	7
case4-3-3	140	160	180	2	10
case4-4-1	160	180	200	2	4
case4-4-2	160	180	200	2	7
case4-4-3	160	180	200	2	10

1. 一番短い RTT を必要とする端末から順番に、現時点で接続時 RTT が一番短い基地局に優先的に割り当てる（グリーディ法）（解法 2）
2. 各端末をランダムに各基地局に割り当てる（解法 3）

6.2 実験の評価

6.2.1 RTT ギャップ

パターン 1 における各ケース・各解法の RTT ギャップの平均を表 6.3 および図 6.1 に示す。

表 6.3: 実験 1(パターン 1) のシミュレーション結果

ケース名	RTT ギャップの平均 (ms)			ケース名	RTT ギャップの平均 (ms)		
	解法 1	解法 2	解法 3		解法 1	解法 2	解法 3
case1-1-1	0.00	0.00	1.44	case2-1-1	0.44	5.40	9.30
case1-1-2	0.00	1.80	2.55	case2-1-2	0.00	27.00	9.84
case1-1-3	0.00	12.60	2.08	case2-1-3	0.00	54.60	7.00
case1-2-1	0.00	0.00	3.31	case2-2-1	6.12	12.60	14.86
case1-2-2	0.00	9.00	5.65	case2-2-2	1.40	34.20	15.38
case1-2-3	0.00	19.80	4.24	case2-2-3	1.40	67.80	14.76
case1-3-1	2.98	5.40	13.90	case2-3-1	13.32	19.80	22.48
case1-3-2	0.66	16.20	8.98	case2-3-2	11.16	41.40	22.38
case1-3-3	0.66	27.00	8.51	case2-3-3	11.16	81.00	23.10
case1-4-1	10.18	12.60	18.14	case2-4-1	20.52	27.00	29.62
case1-4-2	7.78	23.40	16.56	case2-4-2	20.44	54.60	29.78
case1-4-3	7.78	34.20	17.05	case2-4-3	20.44	94.20	28.98

表 6.4: 実験 1(パターン 2) のシミュレーション結果

ケース名	RTT ギャップの平均 (ms)			ケース名	RTT ギャップの平均 (ms)		
	解法 1	解法 2	解法 3		解法 1	解法 2	解法 3
case3-1-1	5.4	5.7	11.5	case4-1-1	6.3	6.9	16.7
case3-1-2	5.4	6.6	9.4	case4-1-2	6.3	8.7	11.1
case3-1-3	5.4	7.5	7.5	case4-1-3	6.3	10.5	16.9
case3-2-1	11.4	11.7	15.6	case4-2-1	12.3	12.9	18.5
case3-2-2	11.4	12.6	11.7	case4-2-2	12.3	14.7	16.3
case3-2-3	11.4	13.5	15.4	case4-2-3	12.3	16.5	14.5
case3-3-1	17.4	17.7	19.3	case4-3-1	18.3	18.9	22.7
case3-3-2	17.4	18.6	23.5	case4-3-2	18.3	20.7	18.9
case3-3-3	17.4	19.5	25.6	case4-3-3	18.3	22.5	22.3
case3-4-1	23.4	23.7	30.3	case4-4-1	24.3	24.9	27.7
case3-4-2	23.4	24.6	28.3	case4-4-2	24.3	26.7	31.7
case3-4-3	23.4	25.5	24.3	case4-4-3	24.3	28.5	33.5

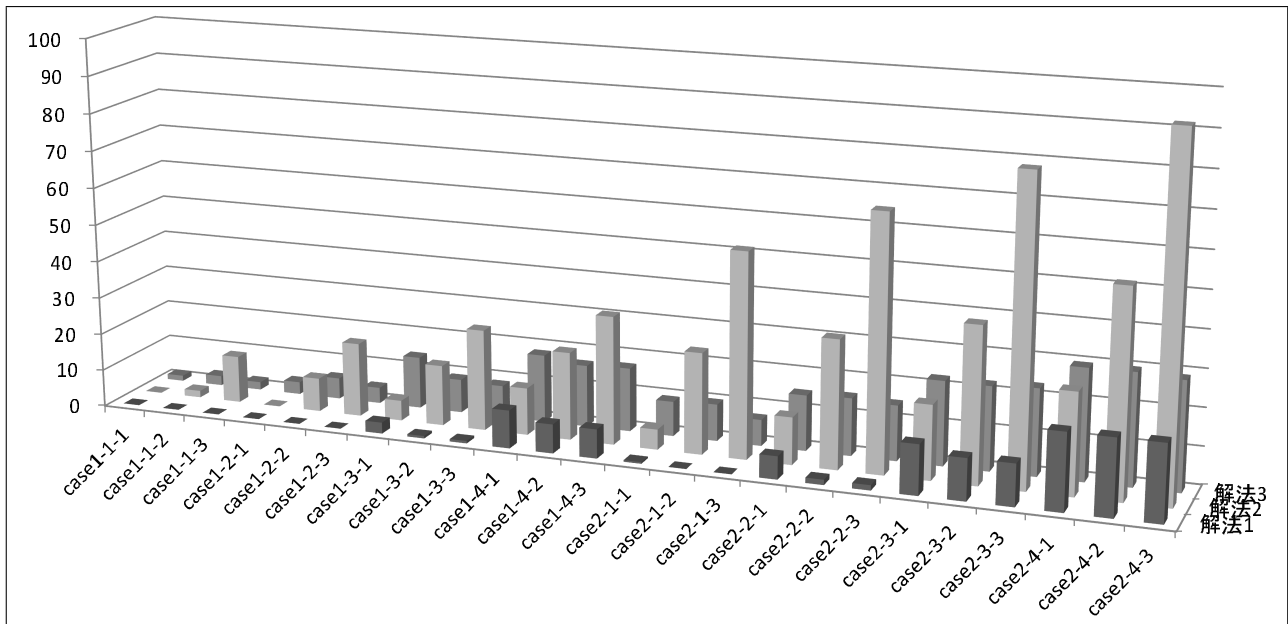


図 6.1: 実験1(パターン1)のシミュレーション結果 (グラフ)

すべてのケースにおいて、3つの解法のうち解法1（本提案システム）のRTTギャップ平均値が、一番小さい値を取っている。

解法2は、RTT増分が小さくかつ収容残数が小さいケースではRTTギャップ平均値も小さいが、RTT増分が大きい、もしくは収容残数が大きい場合にはRTTギャップ平均値が大きくなる傾向がある。これは、解法2が現時点でのRTT値を元に接続先を判断しているからである。しかし実際には、接続端末数によってRTTが変動するため、結果として得られるRTTギャップ平均値は大きくなる。これに比べて、解法1（本提案システム）は、取り得るすべての組み合わせに対して、割り当て後のRTT値も考慮して最適な組み合わせを抽出しているため、RTTギャップ平均値は一番小さい値を取ることになる。解法3と比べると、すべてのケースで解法1のほうが安定的により小さい値を取っている。これらのことから、RTTギャップの最小化において本提案システムが有効であることが確認できた。

しかし現実的には、一度の割り当て計算で対象になる端末数が100台までになるケースは、少ないと考えられる。次にパターン2における各ケース・各解法のRTTギャップの平均を表6.4に示す。パターン2においては、対象台数は10台であるが、これを見ると、台数が少ない場合でも、すべてのケースにおいて解法1が他の解法よりも短い値を取っている。これにより、対象台数が少ない場合でも、RTTギャップの最小化において本提案システムが有効であることが確認できた。

6.2.2 基地局割り当てに要する処理時間

パターン 1 における解法 1 で与えられるコスト行列のサイズは 100×100 であり、計算回数（図 5.2 の④に相当するハンガリアン法の実施回数）は、最大で 5,151 回である．本実験では、次の実験環境において処理を行った．

- OS : Windows7 64bit
- CPU : Intel Corei7 3.50GHz
- メモリ : 16.0GB

また、プログラミング言語としては、C++を使用した．

本実験において、パターン 1 における解法 1 の処理時間はすべてのケースで 1 秒以下であった．これらの値は、ユーザがある一定時間以上、同じアプリケーションを使用し続ける状況においては、十分に有効な値であると考えられる．これらのことから、処理時間の観点からも本提案システムが有効であることが確認できた．

第7章 割り当て問題モデルの改善

7.1 端末満足度の定義

一般的に、TCP を用いるアプリケーションの最大 TP は RTT の影響をうけることが知られているため、4.1 節では、RTT のみがユーザ満足度に影響を与えるものとして考えた。しかし、この最大 TP は、ウィンドウサイズを 64kB に固定して計算した場合の TCP 通信における理論値に過ぎず、現実の通信においては、ウィンドウサイズは自動調整されるため、理論値とは差異がある。また、最大 TP の理論値は、あくまでも 1 つの TCP コネクションを前提にしているが、アプリケーションによっては複数のコネクションが使用されるものもあり、その場合の見かけ上の TP は増えることになる。これらのことから、従来システムでは、例えば高い TP を必要とする動画アプリを使用していた人が、最適ではない基地局に接続される可能性があった。そこで、RTT に加えて TP も考慮したユーザ満足度について検討する。

ここではまず、各アプリケーションの種類において、ユーザ満足度に影響を与えるネットワーク指標について考える。厳密なリアルタイム性を要求されるアプリケーションにおいては、端末と対象サーバ間の RTT が重要である。RTT の値が大きいと、端末と対象サーバ間での通信においてタイムラグが発生することになり、ユーザの満足度を低下させることになる。厳密なリアルタイム性を要求されないアプリケーションにおいては、ある一定時間内に対象サーバから端末まで送信できるデータ量を示す TP が重要であると言える。これらを踏まえ、各アプリケーション分類におけるネットワーク指標を表 7.1 のように設定した。なお、通話アプリケーションについては音声のみの通話を対象とする。

ここでは、以下の 2 つのことから、アプリケーションの種類毎に、TP と RTT のどちらかのみをユーザ満足度に影響を与えるネットワーク指標とする。

- TP が要求を満たしている場合は、RTT も要求を満たしていると考えられる。
- RTT が重要なアプリケーションにおいては、TP は重要ではない。

表 7.1: 各アプリケーション分類におけるネットワーク指標

アプリケーション	ネットワーク指標
ブラウザ	TP
動画ストリーミング	TP
通話アプリケーション	RTT
その他	-

本章では、各アプリケーションをネットワーク指標を基にグループ G_{TP} とグループ G_{RTT} に分類し、それぞれのアプリケーションを使用している端末の満足度（端末満足度）を、式 7.1 と定義する．本章では、端末満足度を最大化することにより、ユーザ満足度を最大化することができるとする．

$$S_i = \begin{cases} \frac{TP_{link}}{TP_{need}} & (APP_i \in G_{TP}) \\ \frac{RTT_{need}}{RTT_{link}} & (APP_i \in G_{RTT}) \end{cases} \quad (7.1)$$

ここで、 S_i は端末 i の満足度、 APP_i は端末 i で使用されているアプリケーション、 TP_{need} はアプリケーションが必要とする TP（必要 TP）、 TP_{link} は端末がある基地局に接続した場合に得られる TP（接続時 TP）、 RTT_{need} は使用しているアプリケーションが必要とする RTT（必要 RTT）、 RTT_{link} は端末がある基地局に接続した場合に得られる RTT（接続時 RTT）を、それぞれ示す．

例えば、 G_{TP} に分類されるアプリケーションにおいて、必要 TP が 1Mbps、接続時 TP が 0.5Mbps の場合、端末満足度は 0.5 となる（例 1）．また、 G_{RTT} に分類されるアプリケーションにおいて、必要 RTT が 40ms、接続時 RTT が 80ms の場合、端末満足度は 0.5 となる（例 2）．例 1、例 2 とともに、端末満足度が 0.5 となるが、理想に対する満足度の比率という意味から、TP の 0.5 と RTT の 0.5 を同等とみなすこととする．

本研究の目的は端末満足度 S_i の調和平均の最大化であり、本研究における目的関数は以下の

通りである．

$$\text{maximize } \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{S_i}} \quad (7.2)$$

$$\text{subject to } 0 < S_i \leq 1 \quad (7.3)$$

ここで n は，対象エリアに存在する端末数を示す．なお 4.1 では，必要 RTT と接続時 RTT との差（RTT ギャップ）を，低減すべき目的関数として扱っていた．しかし，求められる RTT の値が小さいアプリケーションに比べ，求められる RTT の値が大きいアプリケーションのほうが，RTT ギャップが大きくなる傾向があるため，各アプリケーションを平等に扱っていることにはならないという問題があった．そこで，ここでは，実際に得られる値と必要な値の比率を扱うこととする．

7.2 G_{TP} に属するアプリケーション

7.2.1 必要 TP

まず，ブラウザにおいて必要な TP は，4.2.2 に示した通り，6Mbps とする．

次に，動画ストリーミングアプリケーションにおいて必要な TP について考える．現在日本で多く利用されている動画ストリーミングサービスが公表している通信条件を，表 7.2 に示す．これらの内容を踏まえ，動画ストリーミングにおける必要 TP は，2Mbps とする．

表 7.2: 動画ストリーミングサービスにおける通信条件

サービス名	通信条件
hulu	1Mbps
U-NEXT	2Mbps
楽天 SHOWTIME	1Mbps

7.2.2 接続時 TP

ある端末がある基地局に接続した場合に得られる TP は，実際にその基地局に接続しないと正確には把握できない．しかし，各端末がすべての基地局に接続して TP を計ることは現実的では

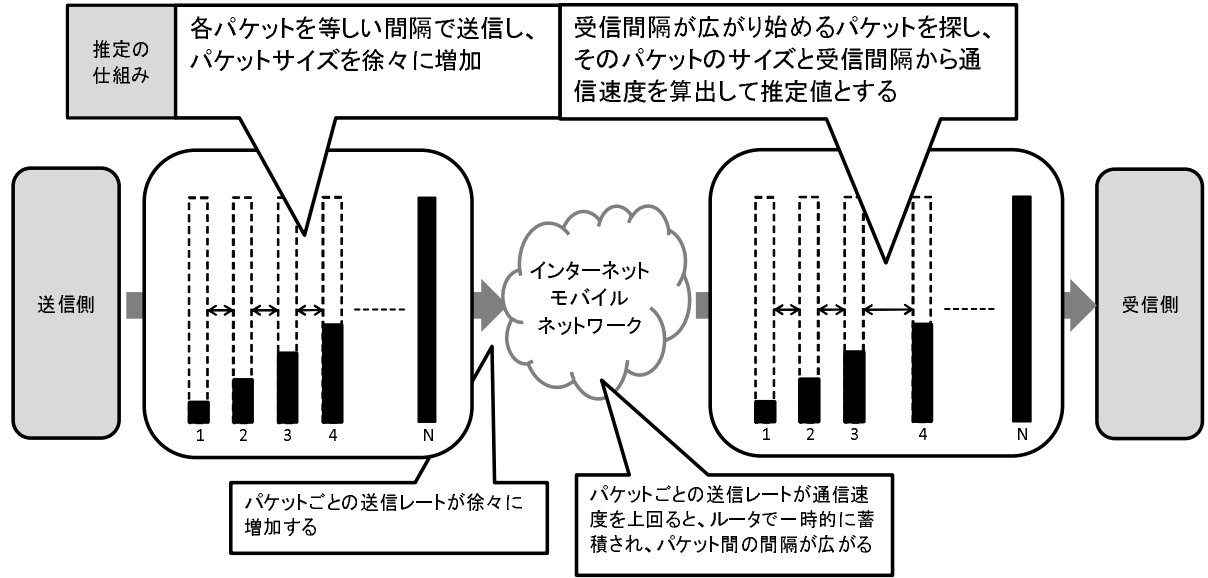


図 7.1: PathQuick の仕組み

ない．そこで本研究では，PathQuick の技術を利用して，バックボーンネットワークからアクセスネットワークを経由した各基地局までの TP を定期的に把握することとする．PathQuick は，各パケットを等しい間隔で送信し，パケットサイズを徐々に増加させていくことにより，受信間隔が広がり始めるパケットのサイズと受信間隔から，TP を算出する手法である [13]．PathQuick の仕組みを図 7.1 に表す．

ただし，基地局に接続した場合に得られる TP は動的に変化すると考えられるが，その都度 PathQuick による値の取得を行うことは，処理時間の観点から考えて現実的ではない．一方，ある基地局の TP は，その基地局に接続している端末の数に影響されると考えられる．そこで，PathQuick による TP の取得を定期的に行い，その後の TP の変化は，接続端末数から計算することとする．今，PathQuick によって得られた，ある基地局の TP の値を TP_{pq} とし，その後にその基地局に接続された端末数を x とする．また，当該基地局に接続される端末数による当該基地局の TP の変化を表す TP 関数を $f_{tp}(x)$ とする． $f_{tp}(x)$ は， x についての単調減少関数である．この時，当該基地局の接続時 TP (TP_{link}) は，式 7.4 で表すことができる．

$$TP_{link} = TP_{pq} + f_{tp}(x) \quad (7.4)$$

7.3 G_{RTT} に属するアプリケーション

通話アプリケーションに必要な RTT は，4.2.1 項に示した通り，200ms とする．

接続時 RTT については，4.3 節と同様に，ping により取得し，式 4.4 で表されるものとする．

第8章 提案システムの改善

7章を受けて、提案システムの改善点を示す．なお、端末制御部については変更は無い．

8.1 基地局情報取得部の改善

改善システムでは、PathQuick および ping を使用して、各端末が各基地局に接続した場合に得られる接続時 TP および接続時 RTT を定期的に把握する．

PathQuick, ping を使用した基地局情報取得のシステム構成を図 8.1 に示す．接続先コントロールサーバから各基地局に接続した情報取得用端末に対して定期的にパケットを送信する．情報取得用端末は、受信したパケットの受信間隔を基に、アクセスネットワークを経由した各基地局への TP(TP_{pq}) を定期的に把握する．また従前通り、接続先コントロールサーバから各基地局に対して定期的に ping パケットを送信し、各基地局までの RTT(RTT_{ping}) を定期的に算出する．

8.2 接続先決定部の改善

各基地局に対する各端末の端末満足度を基に、全体収容数 M から端末数 n 個だけ抽出した基地局リソースと、 n 個の端末における、最適な組み合わせを算出する．

この時、各端末における必要 TP もしくは必要 RTT は、各端末で使用されているアプリケーションに基づいて、7.2.1 項および 4.2.3 項の値を設定する．また、接続時 TP および接続時 RTT は、基地局情報取得部によって定期的に取得された TP_{pq} , RTT_{ping} およびその後に対象基地局に接続された端末数を基に、式 7.4 および式 4.4 に従って算出される．これらの値を基に、端末満足度を算出する．

なお、ここで端末満足度が 1 以上の時は、ユーザが体感するレスポンスタイムは自身が望むものよりもよくなるが、これはシステム全体の利用効率には寄与しない．よってここでは、端

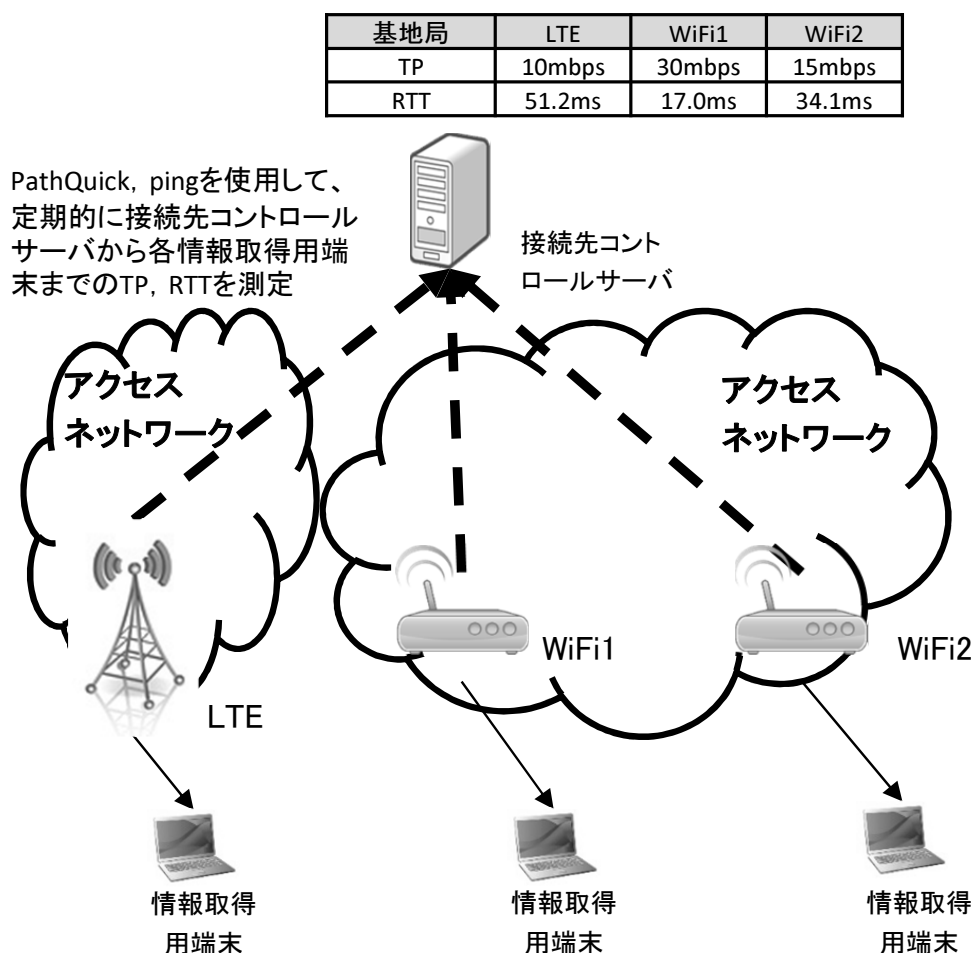


図 8.1: PathQuick, ping を使用した基地局情報取得システム構成

未満足度が1以上の場合は、すべて1に置き換える．また、アプリケーションの種類が「その他」の場合、接続時 TP、接続時 RTT の値に寄らず、必ず端末の要求は満たされると見なし、端末満足度は1とする．

全体収容数 M から、端末数 n を抽出するすべての組み合わせについて、同様の計算を行う．すべての組み合わせで算出された解のうち、端末満足度の調和平均が最大となるものを、全体の最適解として選択する．ここで、複数の最適解が得られた場合は、全端末における端末満足度の最低値が最大の組み合わせを採用する．接続先決定ロジックの流れを図 8.2 に示す．

本システムでは、上記の割り当て処理を、新規参入端末以外に、対象エリア内の既存端末に対しても定期的に実行する．この時、これまで接続されていた基地局とは異なる基地局に割り当てられる（ハンドオーバー）既存端末が発生する可能性があるが、ここではハンドオーバーによる通信断が満足度に与える影響は無視できるものとする．

なお本研究では、上記の最適解の算出において、従前のシステムと同様、5.3 節で述べたハン

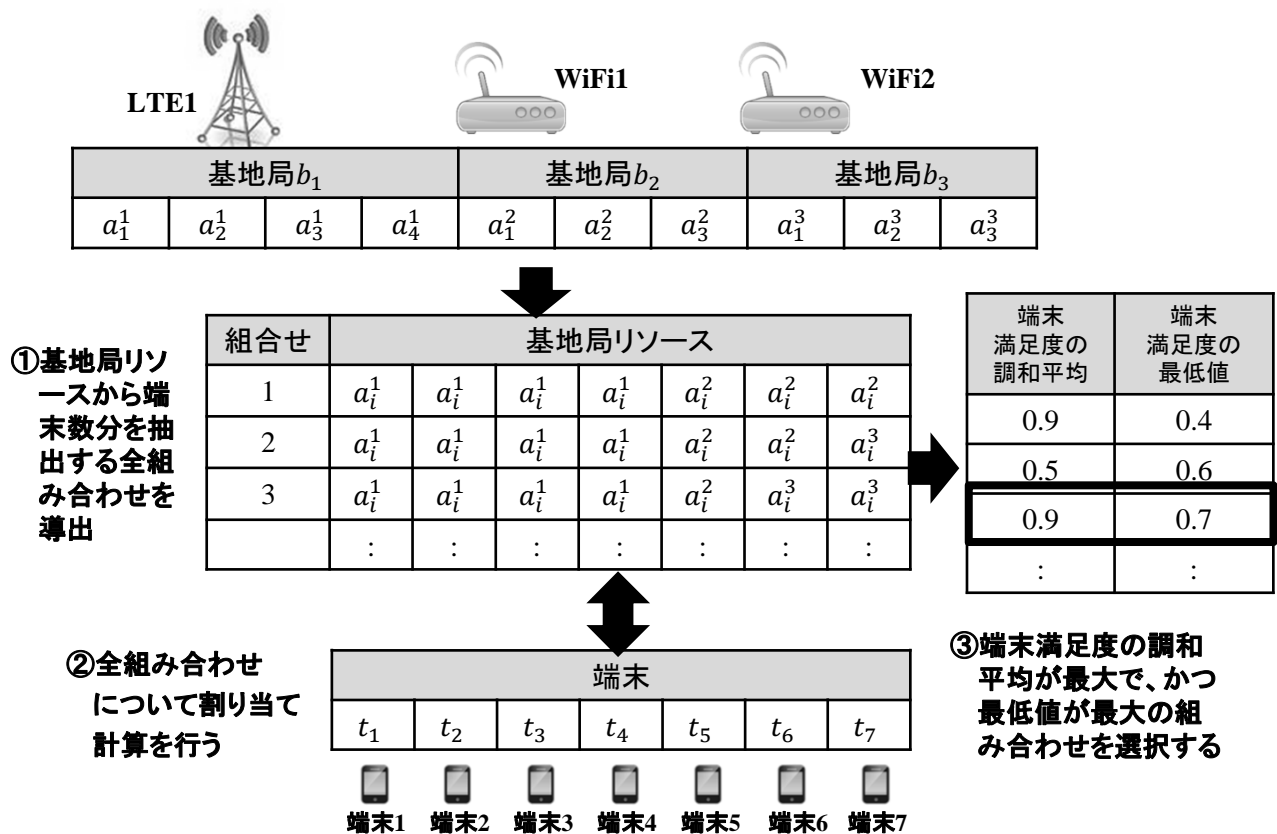


図 8.2: 改善システムにおける接続先決定ロジックの流れ

ガリアン法を使用する。

8.3 システム要求事項

改善した提案システムに求められる条件は以下の2つになる。

端末満足度の最大化

改善した提案システムでは、ユーザ満足度の指標として改めて定量化した端末満足度を最大化することが求められる。

一定時間内での基地局割り当て処理

改善した提案システムにおいても、従来のシステムと同様、ユーザが1つのアプリケーションを30秒程度使い続けることを想定し、基地局割り当て処理が数秒オーダーで終了することが求められる。

第9章 シミュレーション再実験による評価

大都市の駅内における1エリアを想定して、8章で述べた改善システムのうち接続先決定部についてシミュレーションプログラムを作成し、実験を行った。

9.1 実験の概要

駅内のあるエリアにおいて接続可能な3つの基地局が存在していると仮定し、表9.1に示す4つのケースで端末の割り当てを行った（実験2）。

ここで各ケースの特徴をまとめると以下の通りである。

ケース1 1つの基地局だけ値が異なる。TPとRTTに負の相関関係がある。

ケース2 全ての基地局の値が異なる。TPとRTTに負の相関関係がある。

ケース3 全ての基地局の値が異なる。TPとRTTに正の相関関係がある。

ケース4 全ての基地局の値が異なる。TPとRTTに相関関係がない。

各ケースにおけるTP初期値はPathQuickによって取得された値に、RTT初期値はpingによって取得された値にそれぞれ相当する。

各基地局の収容可能数は、全て150台とした。各基地局に接続される端末は、0台から150台の値を取ることになる。今回の実験では、TP関数、RTT関数は1次関数とみなし、結果とし

表 9.1: 実験2における各基地局のTP初期値・RTT初期値

Case	基地局 1		基地局 2		基地局 3	
	TP	RTT	TP	RTT	TP	RTT
1	10Mbps	100ms	10Mbps	100ms	15Mbps	50ms
2	10Mbps	100ms	15Mbps	75ms	20Mbps	50ms
3	10Mbps	50ms	15Mbps	75ms	20Mbps	100ms
4	20Mbps	100ms	15Mbps	50ms	10Mbps	75ms

表 9.2: 実験 2 における各アプリケーションの必要 TP・必要 RTT

アプリケーション	グループ	必要 TP	必要 RTT
ブラウザ	G_{TP}	6Mbps	-
動画ストリーミング	G_{TP}	2Mbps	-
通話アプリケーション	G_{RTT}	-	200ms
その他	-	-	-

て TP が 7.5Mbps～15Mbps の値を，RTT が 1ms～300ms の値を取ると仮定して，全ての基地局において端末 1 台あたりの TP の増分を -0.05Mbps ，RTT の増分を 2ms とした．これらは，それぞれ TP 関数および RTT 関数の傾きに相当する．

各端末で使用しているアプリケーションとしては，「ブラウザ」「動画ストリーミング」「通話アプリケーション」「その他」のうちのいずれかをランダムに割り当てた．各アプリケーションにおける必要 TP および必要 RTT は，表 9.2 の通りとする．なお，ここでは一定時間以上同じアプリケーションが使用されているものとし，使用しているアプリケーションが途中で変わった場合は新規参入端末と見なすことにする．

同エリアには，当初 100 台の端末が存在し，3 つの基地局にランダムに割り当てられているとする．また，1 秒毎に 0 台～1 台の離脱端末と，1 台～2 台の新規参入端末が発生することとし，その度に割り当て計算（イテレーション）を行う．イテレーションを 200 回繰り返して 1 回のシミュレーションとする．これらの一連のシミュレーションを 20 回実施し，各回の平均を取った．

本実験では，まず解法 1 として，200 回のすべてのイテレーションにおいて，新規参入端末のみを対象に割り当て計算を行った．次に，解法 2 として，イテレーションの 50 回，100 回，150 回，200 回では既存端末も含めた全端末での割り当て計算を行い，それ以外の回では新規参入端末のみを対象とした割り当て計算を行った．

シミュレーションプログラムでは，式 4.6 で求められる各基地局の収容可能数全体から端末数分を抽出しうるすべての組み合わせ数に対して，ハンガリアン法による計算を行い，全組み合わせの中で端末満足度の調和平均が最大となる組み合わせの中で，最低値が最大になる組み合わせを選択している．

また，提案システムでの計算（解法 1，解法 2）以外に，以下の 2 つのロジックについても，各ケースにおける計算を行った．

1. 文献 [14] で提案されている手法（解法 3）
2. 各端末をランダムに基地局に割り当てる手法（解法 4）

なお、解法 3 は、各基地局の TP および RTT から、AHP (Analytic Hierarchy Process) を使用して取得した目的関数が最大になる基地局に、順番に端末を割り当てる手法であり、グリーディ法をベースとしている。本研究では、限られたリソースを複数の端末で効率よく利用し合うためには、過度な割り当てを回避しなければならないと考え、端末満足度という概念を目的関数に含めている。解法 3 では、必要 TP や必要 RTT から算出される端末満足度という概念は含まれていないが、敢えて比較を行った。

9.2 実験の評価

9.2.1 端末満足度

各ケース、各解法のシミュレーションによって得られた端末満足度の値を、図 9.1～9.4 に示す。ここで示した端末満足度は、式 7.1 で示した各端末の端末満足度の調和平均を算出した上で、20 回の試行回数分の相加平均を算出した値である。

まず、今回の実験では、0 台～1 台の離脱端末と、1 台～2 台の新規参入端末を 1 秒毎に発生させているため、イテレーションを重ねる毎に、エリア内の端末が増え、全体として端末満足度は低下する傾向にある。解法 4 (ランダム) がいずれのケースも徐々に低下していることは、そのためである。

その上で、解法 1 (新規端末のみ対象) と解法 2 (既存端末も対象) を比べると、すべてのケースで解法 2 (既存端末も対象) のほうが高い端末満足度を示している。このことから、既存端末も含めた割り当て計算を定期的に行うことが有効であると考えられる。

また解法 2 (既存端末も対象) は、解法 3 (グリーディ法)、解法 4 (ランダム) と比べても、50 回目のイテレーション以降は、全てのケースにおいて端末満足度が高い結果となっている。1 回～49 回のイテレーションでは、当初ランダムに割り当てられた既存端末が一度も割り当て計算の対象となっていないため、全体の端末満足度が下がっているが、50 回目のイテレーションで既存端末を対象とした割り当て計算を一度実施することにより、それ以降のイテレーションでは端末満足度が高い状態を維持することが分かった。

以上のことから、本提案システムが有効であることが確認できた。

9.2.2 割り当て計算に要する処理時間

本実験では次の環境において処理を行った。

- CPU : 2.6GHz Intel Core i5
- メモリ : 8.0GB
- プログラミング言語 : Java

解法 2, 解法 3, 解法 4 のケース 1 における対象端末数毎の処理時間を表 9.3 に示す。

解法 2 は, 解法 3, 解法 4 に比べれば時間がかかっているが, 数 10 秒オーダーで終了することが確認できた。これはサーバのスペックを高めることなどにより, システム要件である数秒オーダーを実現することが可能な範囲であると考えられる。

解法 3, 解法 4 の処理時間は十分に短い, 端末満足度を考慮していない。限られたリソースを複数の端末で効率よく利用し合うためには, 過度な割り当てを回避しなければならず, 端末満足度を考慮した本提案法式の有効性は十分にあると考えられる。

なお, 解法 2 については, 端末数が 200 台から 250 台に増えた時点で処理時間が減少している。これは, 各基地局の収容可能数による制限により, 組み合わせ数が減少するためと考えられる。

また, どの解法においても, 全てのケースでほぼ同じ値を取った。これは, ケースが異なっても RTT と TP が変化するだけで, 処理時間には影響がないためと考えられる。

表 9.3: 実験 2 における端末数毎の処理時間

端末数	処理時間 (秒)		
	解法 2	解法 3	解法 4
50	0.112	0.003	0.002
100	1.923	0.006	0.005
150	9.526	0.010	0.009
200	20.742	0.014	0.014
250	19.579	0.019	0.020
300	6.424	0.026	0.027

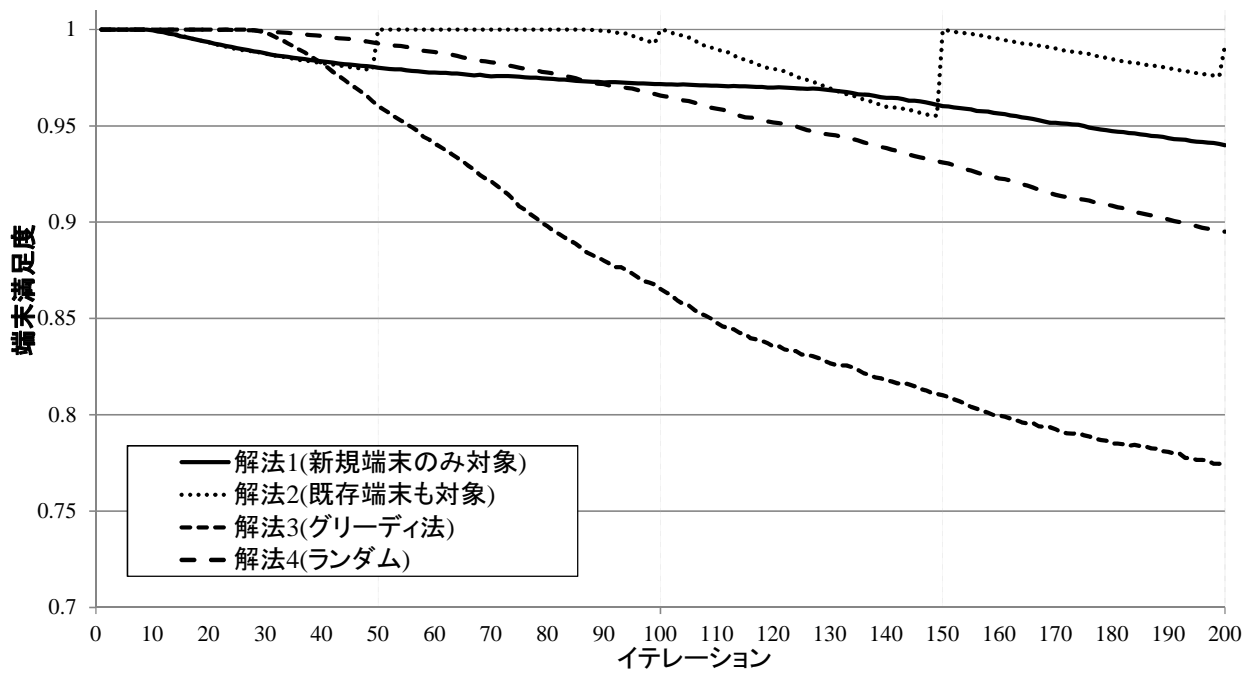


図 9.1: 実験 2 (ケース 1) のシミュレーション結果

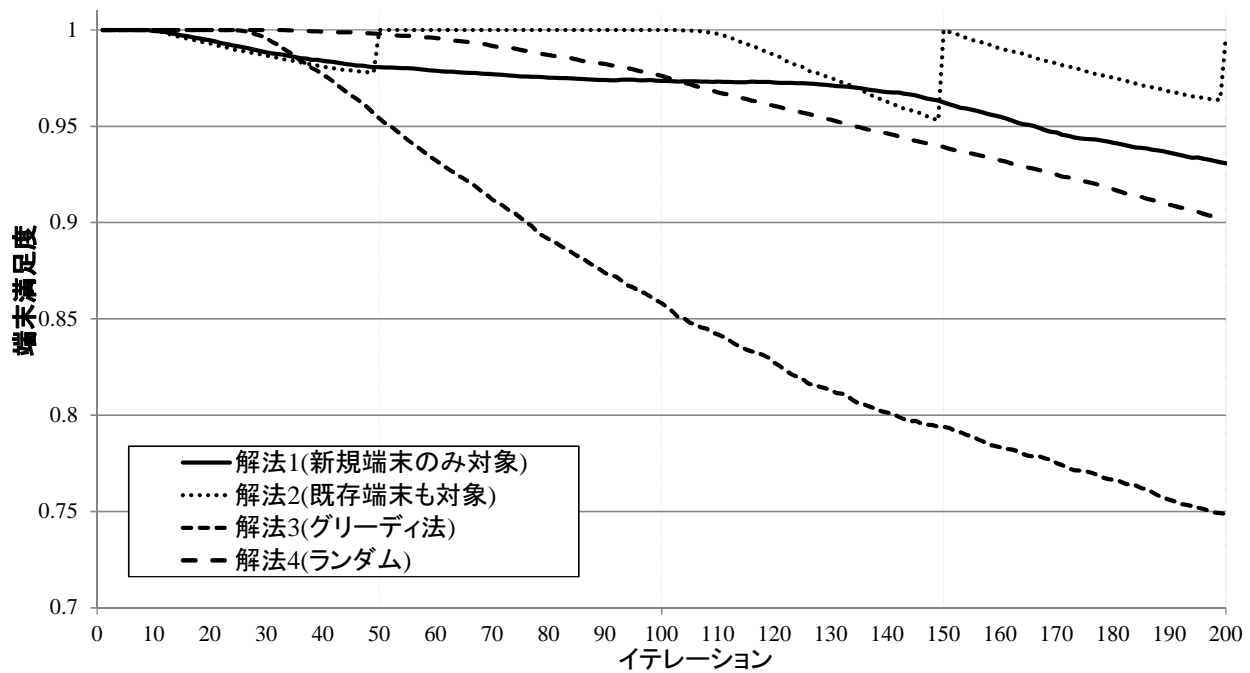


図 9.2: 実験 2 (ケース 2) のシミュレーション結果

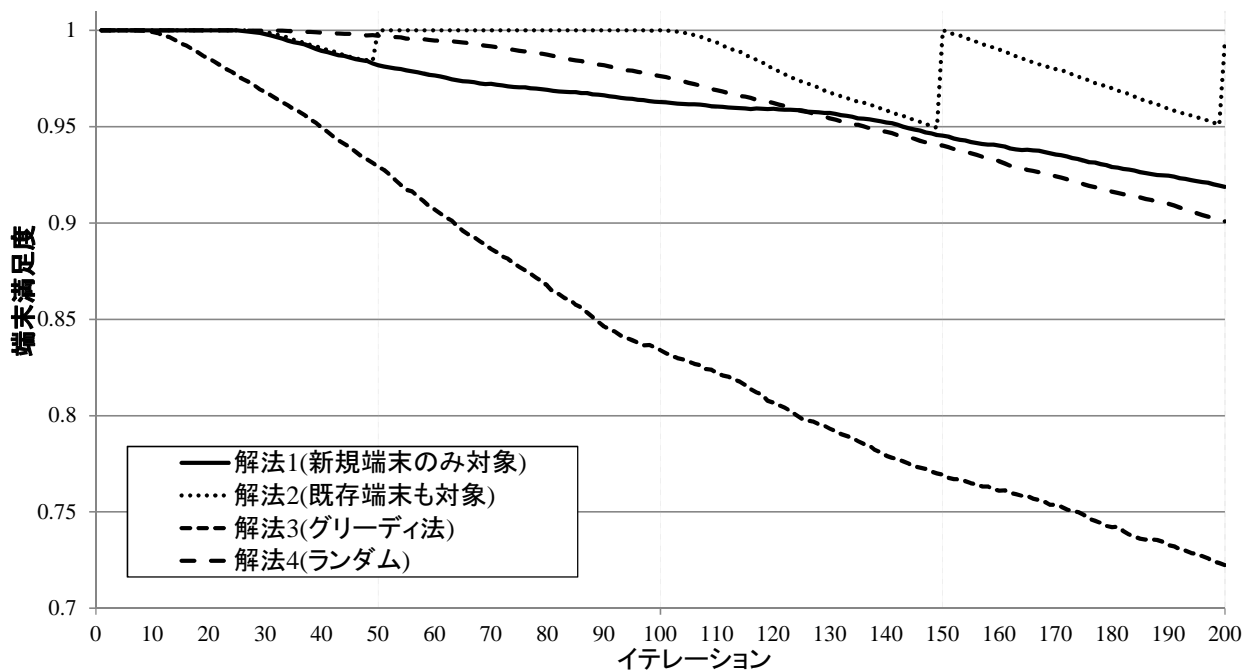


図 9.3: 実験 2 (ケース 3) のシミュレーション結果

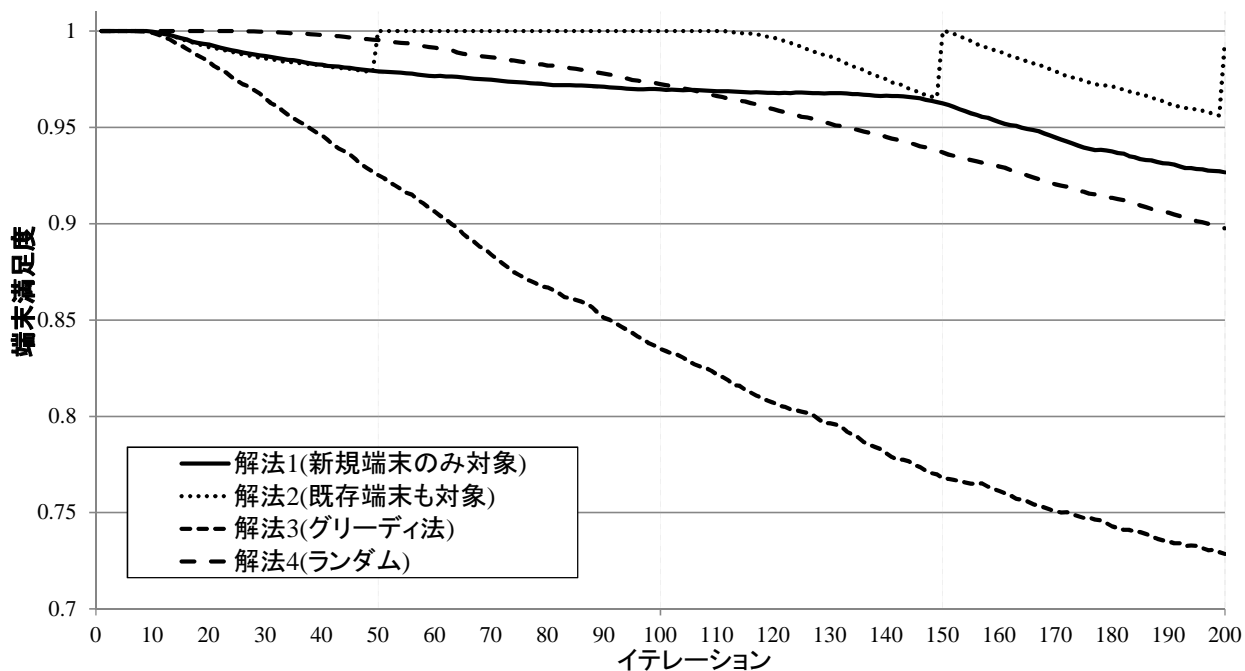


図 9.4: 実験 2 (ケース 4) のシミュレーション結果

第10章 まとめと今後の課題

2章で述べた各課題に対する，提案システムの対応状況を表 10.1 にまとめた．

表 10.1: 提案システムの課題対応状況

課題	対応状況
ユーザ満足度の定量化	○
対象とする端末の地理的範囲	○
対象とする端末の時間的範囲	○
必要な情報のリアルタイムな把握	○
システム構成	×
行動予測機能の実装	×

本研究では，ユーザ満足度を表す定量的な指標として，ユーザが使用しているアプリケーションを考慮した端末満足度を定義した上で，端末満足度を最大化させる接続先決定ロジックを割り当て問題として定式化した．また，ハンガリアン法を用いた接続先決定システムを構築し，シミュレーションプログラムによる実験を行った．その結果，最適な割り当てを，一定時間内に選択することが可能であることが分かった．

また，対象とする端末の地理的範囲を，LTE 基地局 1 台，WiFi 基地局 2 台として明確にし，対象とする端末の時間的範囲としては，端末の参入と離脱が連続的に発生する環境に対応した．

さらに本研究では，必要な情報のリアルタイムな把握するための構成を提示し，その上で処理時間についても有効性を示した．

今後は，実システムを構築して，本研究で定義した端末満足度がユーザ満足度の定量的な指標になっているのかについて確認する．

また，提案システムのシステム構成は，グリーディ法やランダムな手法に比べれば複雑になってしまっている．今後は，よりシンプルなシステム構成を検討する．

さらに行動予測機能の実装についても，今後検討していく予定である．

参考文献

- [1] 総務省：情報通信白書平成 28 年版, <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h28/html/nc252110.html>.
- [2] 電波政策 2020 懇談会：電波政策 2020 懇談会報告書, http://www.soumu.go.jp/main_content/000430220.pdf
- [3] Cisco：Cisco VNI 2016/2021, <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>
- [4] 齊藤智也, 稲井寛：無線 LAN における動的アクセスポイント選択方式, 電子情報通信学会技術報告, NS2003-138, Vol.103, No.386, pp.33-36 (2003).
- [5] 阿部貴充, 福田豊, 尾家祐二：Wireless LAN におけるアクセスポイント選択方式の提案とその評価, 電子情報通信学会技術報告, IN2002-206, Vol.102, No.693, pp.23-28 (2003).
- [6] Gaurav S. Kasbekar, Pavan Nuggehalli, Joy Kuri：Online Client-AP Association in WLANs, Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks, 2006 4th International Symposium on, pp.1-8 (2006).
- [7] Huazhi Gong, Nahm, K., JongWon Kim:Distributed Fair Access Point Selection for Multi-Rate IEEE 802.11 WLANs, Consumer Communications and Networking Conference, 5th IEEE, pp.528-532 (2008).
- [8] 竹内彰次郎, 瀬崎薫, 安田靖彦：IEEE802.11e WLAN network におけるアクセスポイント選択手法, 電子情報通信学会論文誌 (B), Vol.J89-B, No.4, pp.431-442 (2006).
- [9] 武智竜一, 岡村亜紀子, 中津川恵一, 浜野有一朗, 佐藤康行：モバイルネットワークにおける最適経路制御, 電子情報通信学会論文誌 (B), Vol.J89-B, No.2, pp.195-203 (2006).

- [10] 森岡康史, 東野武史, 塚本勝俊, 小牧省三: 異種サービス混在環境における無線LAN アクセスポイント選択アルゴリズム, 情報処理学会論文誌, Vol.50, No.2, pp.750-764 (2009).
- [11] 総務省: アナログ電話相当の機能を有する I P 電話用設備に係る現行技術基準 (1), http://www.soumu.go.jp/main_content/000158162.pdf.
- [12] Forrester Consulting: eCommerce Web Site Performance Today, <http://www.damcogroup.com/white-papers/ecommerce-website-perf-wp.pdf>.
- [13] 里田浩三, 大芝崇, 吉田裕志: サービス品質向上のためのネットワーク状態推定・予測技術, 電子情報通信学会技術報告, CQ2013-56, Vol.113, No.293, pp.29-34 (2013).
- [14] Zhikui Chen, Dalian, Qianzi Xiong, Yang Liu, Chongming Huang: A strategy for differentiated access service selection based on application in wlans, Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), 2014 IEEE, pp.317-322 (2014).